

Iina Laakkonen

# LIIMAPUISEN BUMERANGIPALKIN RA- SITUSTEN LASKENTA

Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Toukokuu 2019

# TIIVISTELMÄ

Ilina Laakkonen: Liimapuisen bumerangipalkin rasi-  
tusten laskenta, Calculation of the  
stresses of glulam boomerang beam

Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Rakennustekniikka  
Toukokuu 2019

---

Tässä kandidaatintyössä kerrotaan ensin hieman liimapuun valmistamisesta sekä sen ominaisuuksista. Tämän jälkeen käsitellään rasi-  
tusten laskennan teoriaa sekä elementtimenetelmää  
hyödyntävän ohjelman että käsinlaskennan näkökulmista. Lopuksi tutkitaan liimapuisen bumerangipalkin vetojännityksiä case-esimerkin kautta Ansys-ohjelman sekä Eurokoodi 5:n avulla.

Puun lujuusominaisuudet ovat heikompia sen syitä vastaan kohtisuorassa, minkä takia esimerkiksi puun vetolujuus on pieni, mikä puolestaan johtaa siihen, että usein vetojännitykset ovat mitoitettavia. Tämän kandidaatintyön tarkoitus on mallintaa liimapuinen bumerangipalkki parametrisesti elementtimenetelmää hyödyntävällä ohjelmalla ja laskea vetojännityksen arvo sekä ohjelman avulla että käsin laskukaavoja hyödyntämällä. Lisäksi vertaillaan saatuja tuloksia, sekä pohditaan eroavaisuuksien syitä.

Lopputuloksena voidaan todeta, että ainakin esimerkkitilanteessa eurokoodin avulla käsin laskettu vetojännitys on epävarmalla puolella elementtimenetelmäohjelman avulla saadusta arvosta. Tämä voi olla rakenteiden kestävyys- ja siten myös turvallisuuden kannalta merkittävää.

Avainsanat: Liimapuu, bumerangipalkki, vetojännitys, elementtimenetelmä, FEM

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	YLEISTÄ LIIMAPUUSTA.....	3
2.1	Valmistus.....	3
2.2	Käyttö .....	5
2.3	Yleiset ominaisuudet.....	5
2.3.1	Lujuus- ja kimmo-ominaisuudet.....	5
2.3.2	Palotekniset ominaisuudet .....	6
3.	RASITUSTEN LASKENTA.....	7
3.1	FEM-menetelmä .....	7
3.2	Laskenta eurokoodien mukaan .....	8
4.	CASE-KOHDE .....	11
4.1	Lähtötietoja rasitusten laskentaan.....	11
4.2	Rakenteen mallinnus elementtimenetelmällä .....	11
4.3	Vertailulaskenta eurokoodien mukaan .....	16
4.4	Tulosten vertailu ja eroavaisuuksien pohdinta.....	16
5.	YHTEENVETO.....	19
	LÄHTEET .....	20

# 1. JOHDANTO

Puu on rakennusmateriaalina erittäin suosittu lukuisien etujensa ansiosta. Ensinnäkin puu on uusiutuva luonnonvara, ja sen valmistuksen hiilijalanjälki on pieni. Lisäksi rakenteiden puupinnat voidaan hyvin jättää näkyville, sillä puu on esteettinen rakennusmateriaali. Puu on myös kevyt ja luja materiaali, minkä lisäksi sen palonkestävyys on hyvä. Vaikka puun lujuusominaisuudet ovatkin verrattain hyvät sen keveyteen nähden, vaikuttaa lujuuteen kuormituksen suunta. Puun lujuusominaisuudet ovat heikoimmillaan sen syitä vastaan kohtisuorassa. Esimerkiksi puun vetolujuus syitä vastaan kohtisuoraan on pieni, jolloin usein juuri nämä jännitykset muodostuvat mitoittaviksi.

Puun ominaisuuksia pystytään muokkaamaan puun eri valmistustavoilla. Näin saatuja eri puumateriaaleja ovat esimerkiksi kertopuu, sahatavara sekä liimapuu. Tässä kandidaatintyössä keskitytään kuitenkin erityisesti liimapuuhun, ja vielä tarkemmin bumerangi eli kaarevaan liimapuupalkkiin sekä sen syysuuntaan nähden poikittaiseen vetolujuuteen. Liimapuuta hyödynnetään etenkin kantavissa rakenteissa, sillä muiden puiden tavoin liimapuulla on hyvä lujuus sen painoon nähden. Tämän takia liimapuita käytetäänkin usein rakenteisiin, joilla on pitkät jännevälit.

Työn tarkoituksena on mallintaa bumerangipalkista parametrinen FEM eli elementtimenetelmämalli Ansys-ohjelmalla, jonka jälkeen tulee laskea vetojännityksen arvo Eurokoodi 5:n kaavalla sekä lopuksi vertailla saatuja tuloksia. Työssä pohditaan myös mistä puun vetolujuuden heikkous voisi johtua ja pyritään selvittämään, vastaavatko laskenta sekä mallinnus toisiaan.

Työssä on johdannon ja yhteenvedon lisäksi neljä lukua, jotka sisältävät myös alalukuja. Aluksi tarkastellaan liimapuun valmistustapaa, käyttöä sekä yleisiä ominaisuuksia. Luvussa 3 käsitellään rakenteen rasituksien laskentaa sekä elementtimenetelmän että laskentaohjeiden avulla. Luvussa 4 perehdytään tarkemmin case-esimerkkiin sekä lasketaan puun syysuuntaan kohtisuora vetojännitys bumerangipalkissa käyttäen elementtimenetelmään perustuvaa Ansys-ohjelmaa sekä Eurokoodi 5:n laskentaohjeita. Luvussa 4 esitellään myös saadut tulokset ja vertaillaan niitä keskenään, sekä pohditaan syitä

tulosten mahdollisille eroille. Lisäksi tehdään herkkyystarkastelu eli muutetaan mittoja ja katsotaan, kuinka tulos eroaa alkuperäisestä. Herkkyystarkastelun avulla nähdään, onko rakenne optimaalinen.

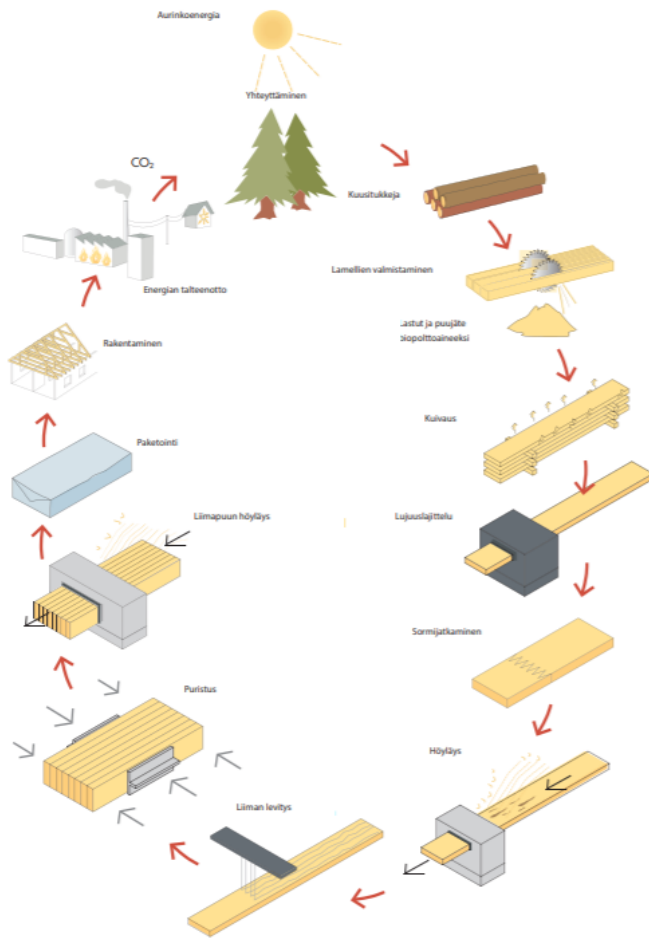
## 2. YLEISTÄ LIIMAPUUSTA

Liimapuulla tarkoitetaan rakennusosaa, joka koostuu vähintään kahdesta yhteen liimasta havupuulamellista, joiden paksuus on 6–45 mm ja joiden syysuunta on rakennusosan pituussuuntainen (Liimapuukäsikirja, osa 2 2015). Koska liimapuu valmistetaan useammasta lamellista, mahdollistuu puun vikojen tasaaminen, mikä puolestaan parantaa valmiin rakenteen ominaisuuksia. Valmistustavan ansiosta on myös mahdollista käyttää pienikokoisia puita hyvinkin suuriin liimapuurakenteisiin.

### 2.1 Valmistus

Liimapuun valmistamisessa käytetään pääasiassa kuusta (myös muita havupuita voidaan käyttää) ja säänkestävää MUF- eli melamiini-urea-formaldehydiliimaa. Puun ja liiman välille muodostuvat adheesiovoimat, eli kahden eri aineen välillä vaikuttavat voimat tekevät liitoksesta ja samalla rakenteesta vahvan. (Liimapuukäsikirja, osa 2 2015)

Valmistusprosessi alkaa sahatavaran kuivaamisella ja rimoittamisella. Puutavara varastoidaan usein kuivatuksen jälkeen tilassa, jossa ilmankosteus on vakio. Tämän jälkeen puutavara lujuuslajitellaan mahdollisimman hyvän lopputuloksen takaamiseksi. Lajittelun jälkeen laudoista valmistetaan sormijatkosmenetelmällä liimapuulamelleja. Sormijatkoslinjalla tasataan lautojen päät, muodostetaan sormiliitokset sekä katkaistaan lamellit haluttuun pituuteen. Myös lautojen kosteutta tarkkaillaan, ja liian kuivat sekä liian kosteat laudat poistetaan linjastolta. Valmiit liimapuulamellit höylätään, minkä jälkeen lapepinnalle levitetään liimaa, ja lamellit asetetaan liimauspuristimeen. Jos halutaan muodostaa kaarevia liimapuurakenteita, tulee lamelleja taivuttaa liimauksen yhteydessä. Lopuksi liimapuun pinnat höylätään, rakenne katkaistaan haluttuun mittaan, pintakäsitellään sekä pakataan. (RIL 153 1984, s. 22–24)



**Kuva 1.** Liimapuun valmistaminen (Liimapuukäsikirja, osa 1 2014, s. 16)

Yllä olevassa kuvassa 1 on esitetty liimapuun valmistaminen kaaviomaisesti. Kuvasta voidaan nähdä, että muun puutavaran valmistamisen ohella on myös liimapuun valmistus energiataloudellista. Vaikka liimapuun valmistamiseen käytetäänkin ei-uusiutuvaa, synteettistä liimaa, sen tarve on niin pientä, ettei se kuormita ympäristöä liiallisesti. Lisäksi esimerkiksi lautojen kuivaamiseen käytetään polttoaineena biomassaa, joka syntyy lautojen valmistamisesta. Usein kuljetus onkin suurin ympäristöä kuormittava tekijä puurakenteiden valmistuksessa.

Liimapuusta valmistettuja rakenneosia on helppo korjata ja työstää jälkikäteen, kuten esimerkiksi hioa. Liimapuu on uudelleen käytettävää, ja keskeinen lähtökohta liimapuutuotteiden kehitystyössä onkin ollut elinkaariajattelu (Liimapuukäsikirja, osa 1 2014).

## **2.2 Käyttö**

Liimapuuta voidaan käyttää rakentamisessa monipuolisesti. Ensisijaisesti se on tarkoitettu kantaviin rakenteisiin, mutta siitä voidaan valmistaa myös esimerkiksi meluaitoja, huonekaluja tai sisustuselementtejä. Liimapuu on helposti muokkautuvaa, sillä lamelleista saadaan valmistettua monen muotoisia ja kokoisia rakenteita.

Koska liimapuulla on omaan painoonsa nähden hyvät lujuusominaisuudet, rakennetaan siitä usein suuriakin jännevälejä vaativia rakenteita. Liimapuulla on lisäksi esimerkiksi parempi korroosionkestävyys kuin teräksellä, ja se on edullisin rakennusmateriaali kaareviin rakenteisiin. Liimapuurakenteet ovat myös verrattain helppoja ja nopeita asentaa, sillä niissä voidaan käyttää yksinkertaisiakin liitoksia. (Liimapuukäsikirja, osa 1 2014)

## **2.3 Yleiset ominaisuudet**

Puurakenteet ylipäättään ovat kestäviä ja hyvin säilyviä oikein suunniteltuna. Vanhimmat puurakenteet ovat yli 1 000 vuotta vanhoja. Kun suunnittelu, valmistus ja käyttö ovat kunnossa, ei rakenteissa ole lahoamisen vaaraa. Kun puu suojataan rakenteellisesti, on tarkoitus pitää puu kuivana tai nopeasti kuivuvana ja näin estää lahoaminen. Kestävyyttä voidaan kuitenkin parantaa myös erikoiskäsittelyllä esimerkiksi käyttämällä kyllästettyjä lamelleja. (Liimapuukäsikirja, osa 1 2014)

### **2.3.1 Lujuus- ja kimmo-ominaisuudet**

Painoonsa nähden liimapuulla on hyvät lujuusominaisuudet. Se on myös keskimäärin lujempaa ja jäykempää kuin samankokoinen sahapuutavara, sahapuutavarassa olevien oksien, sormijatkosten tai syyhäiriöiden vuoksi. Liimapuussa esimerkiksi oksien vaikutus lujuuteen vähenee, sillä se on koottu useista lamelleista. (Liimapuukäsikirja, osa 1 2014) Toisin sanoen laminointivaikutus parantaa puun lujuutta. Liimapuuta valmistettaessa sen lujuutta voidaan parantaa myös eri lujuusluokkaisten sahatavaroiden järkevällä sijoittelulla. Liimapuussa rasitus on yleensä suurin ulkolamelleilla, joten usein tähän tarkoitukseen käytetäänkin lujempaa puutavaraa. (Liimapuukäsikirja, osa 1 2014)



Kuitenkin myös puun kuormitussuunta vaikuttaa sen kestävyYTEEN. Koekappaleilla tehdyt kokeet osoittavat, että puun puristuslujuus on kaksinkertainen sen vetolujuuteen verrattuna. Usein liimapuu murtuu ensin vetopuolella olevasta virheestä, kuten syyhäiriöstä ja lopulta katkeamalla. (RIL 153 1984, s. 34)

### **2.3.2 Palotekniset ominaisuudet**

Vaikka liimapuu onkin palava materiaali, on sen kestävyys tulipalossa hyvä. Tämä perustuu rakenteiden massiivisuuteen ja tasa-aineisuuteen. Palaessaan liimapuu hiiltyy tasaisesti ja syntynyt hiilikerros suojaa puun sisäosia. Hiiltyneen kerroksen alla olevan palamattoman puun lujuus on lähes yhtä suurta kuin palamattoman liimapuun. Tämän takia puu säilyttääkin kantokykynsä hyvin myös palon jatkuessa. (Liimapuukäsikirja, osa 1 2014)

Usein liimapuiset rakenteet ”suojaavat itse itsensä” hiiltymällä, mutta rakenteiden liitoskohdat ja teräksiset liitokset ovat alueita, jotka tulee suojata (Liimapuukäsikirja, osa 1 2014). Rakenneosia voidaan suojata palolta käsittelemällä puuosa esimerkiksi jollakin palonsuojakemikaalilla tai käyttämällä suojaverhousta kuten kipsilevyä.

### 3. RASITUSTEN LASKENTA

Rakenneosien rasituksia voidaan laskea esimerkiksi mallintamalla rakenne elementtimenetelmään perustuvalla FEM-ohjelmalla tai hyödyntämällä Eurokoodeissa olevia laskentaohjeita, jotka perustuvat EU-maiden teknillisten yliopistojen ja esimerkiksi valtion tutkimuslaitosten tutkimuksiin sekä niiden mitoitusten menetelmiin. Tässä työssä käydään läpi näiden kahden tavan eroavaisuuksia bumerangipalkin rasituksia laskettaessa.

#### 3.1 FEM-menetelmä

Rakenneosien ja sen seurauksena myös tuntemattomien mekaniikan suureiden määrä kasvaa käytettäviä rakenteita tarkasteltaessa. Ratkaistakseen tuntemattomat suureet on muodostettava yhtälöryhmä, jossa voi olla todella paljon yhtälöitä ja tuntemattomia suureita. Tämä johtaa siihen, että usein varsinainen laskenta tehdäänkin tietokoneavusteisesti. Ratkaisumenetelmän on toimittava systemaattisesti ja tehokkaasti, sillä tehtävä sisältää paljon tietoja. Vaatimuksena on myös käyttäjäläheisyys: lähtötietojen syöttämisen sekä tulosten tulkinnan tulee olla mahdollisimman helppoa. Tähän vastauksena on kehitetty numeerinen laskentamenetelmä, elementtimenetelmä. (Salmi & Kuula 2017, s. 317)

FEM- (the finite element method) eli elementtimenetelmä mahdollistaa rakenteiden mekaniikan ja lujuusopin ohella esimerkiksi lämmön ja kosteuden siirron, murtumismekaniikan sekä virtausmekaniikan tarkemman tarkastelun. Menetelmän matemaattisten perusteiden selvittyä on se laajentunut myös erilaisten matemaattisten ongelmien ratkaisumenetelmäksi. Samalla esimerkiksi menetelmän tulosten tarkkuuden arviointiin saatiin vakaat matemaattiset perusteet. (Salmi & Kuula 2017, s. 319)

Elementtimenetelmässä rakenne jaetaan hallitsemisen helpottamiseksi pienempiin osiin, jotka liittyvät toisiinsa solmuilla. Tämän jälkeen jokaiselle osalle laaditaan jäykkyyso-matriisit ja solmuille rasitus- sekä siirtymämatriisit. Lopuksi yhtälöt yhdistetään globaalliseksi systeemiksi, jonka avulla ratkotaan tuntemattomat suureet. Tällä tavalla saadaan selville rakenteen käyttäytyminen. Usein apuna käytetään valmista FEM-ohjelmaa, kuten Ansysta tai Robotia, joihin on jo valmiiksi syötetty matemaattiset algoritmit. Suunnittelijan

tulee kuitenkin vielä lopuksi tarkistaa tulosten oikeellisuus ja mallin järkevyys käsin laskemalla (Salmi & Kuula 2017, s. 14).

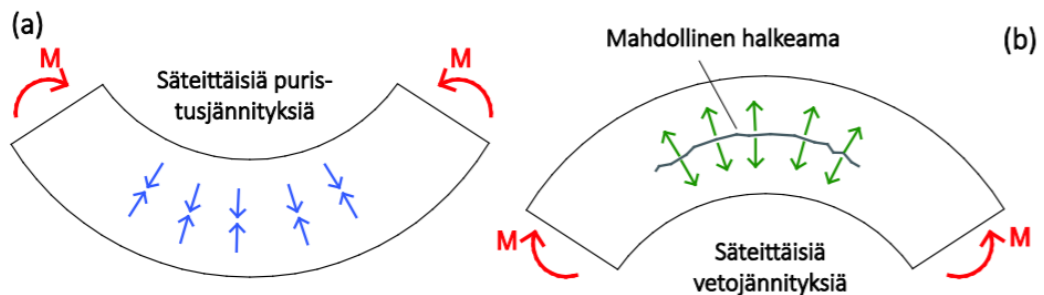
FEM-menetelmän avulla on mahdollista tarkastella yksityiskohtaisemmin rakenteiden rasituksia. Mallista voidaan tehdä myös parametrinen, jolloin rakenteen mittoja muuttamalla pystytään tutkimaan niiden vaikutusta rakenteen kestävyyseli herkkyyssanalyyysin tekemiseen mahdollistuu. Menetelmää käytetäänkin paljon tuotannossa, sillä sen avulla on mahdollista optimoida suunnittelua ja vähentää kuluja.

### 3.2 Laskenta eurokoodien mukaan

Rakenteiden rasituksia voidaan tarkastella myös käsinlaskennan avulla. Esimerkiksi eurokoodit sisältävät kantavien rakenteiden suunnittelustandardeja, joiden avulla on mahdollista laskea rakenteiden rasituksia. Eurokoodit koostuvat 10 pääosasta, joista suurin osa sisältää myös sivuosia, ja ne on laadittu rakenteiden suunnittelun yhtenäistämiseksi Euroopassa. Aiemmin haasteina oli jokaisen maan omat kansalliset standardit, joihin suunnittelijoiden ja tuotevalmistajien tuli perehtyä, jotta työskentely ulkomailla mahdollistui. Esimerkiksi eri maiden sääolosuhteet huomioidakseen löytyy myös eurokoodeista kansallisia liitteitä, joissa kerrotaan kyseisessä maassa käytettävät varmuusluvut. Nykyään eurokoodit ovat eurooppalaisen standardisointijärjestön CEN:in laatimia, ja niitä käytetään suunnittelussa yhdessä kansallisten liitteiden kanssa. (Rakennustuoteteollisuus ry & SFS ry, 2018)

Tässä työssä keskitytään eurokoodi 5:en, sillä se sisältää puurakenteiden suunnittelun. Eurokoodi 5 on jaettu kolmeen osaan: yleisiin ja rakennuksia koskeviin sääntöihin, puurakenteiden palomitoitukseen sekä siltarakenteisiin.

Taivutusmomentin rasittaessa rakennetta, jonka alkukaarevuus on taivutusmomentin tasossa, syntyy rakenteeseen taivutusjännityksen ohella säteittäisiä jännityksiä. Säteittäisiä puristusjännityksiä syntyy, kun taivutusmomentti pyrkii lisäämään palkin kaarevuutta ja vetojännityksiä, kun taivutusmomentin suunta pyrkii oikaisemaan liimapuuosaa kuvan 2 mukaisesti. Jotta syitä vastaan kohtisuorien vetojännitysten aiheuttamat halkeamiset saataisiin minimoitua, harjapalkit vahvistetaan usein esimerkiksi liimaruuveilla tai itseporautuvilla puuruuveilla.



**Kuva 2.** (a) Puristusjännitysten syntyminen. (b) Vetojännitysten syntyminen.  
(Liimapuukäsikirja, osa 2 2015, s.122)

Koska halutaan selvittää puun suurin taivutusmomentista aiheutuva syysuuntaa vastaan kohtisuora vetojännitys, joka on mitoittava, voidaan se laskea eurokoodi 5:n kaavalla

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} - 0,6 \cdot \frac{p_d}{b}, \quad (1)$$

jossa  $p_d$  tarkoittaa palkin yläpinnalla harjan alueella vaikuttavaa tasaisesti jakautunutta kuormaa,  $b$  palkin leveyttä,  $h_{ap}$  palkin poikkileikkauksen korkeutta harjalla ja  $M_{ap,d}$  harjan kohdalla vaikuttavan, kaarevan alareunan suuntaisia vetojännityksiä aiheuttavan momentin mitoitusarvoa. Kaavassa (1) oleva  $k_p$  saadaan laskettua kaavalla

$$k_p = k_5 + k_6 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right) + k_7 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^2, \quad (2)$$

jossa  $h_{ap}$  on kuvan 3 mukainen palkin poikkileikkauksen korkeus harjan kohdalla,  $r$  sekä  $k_5$ ,  $k_6$  ja  $k_7$  saadaan laskettua edelleen kaavojen (3), (4), (5) ja (6) avulla.

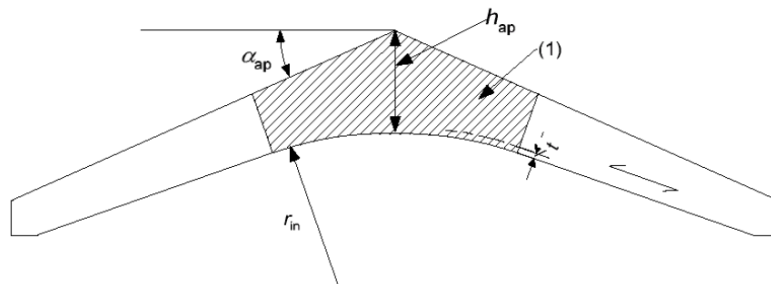
$$r = r_{in} + 0,5 \cdot h_{ap} \quad (3)$$

$$k_5 = 0,2 \cdot \tan(\alpha_{ap}) \quad (4)$$

$$k_6 = 0,25 - 1,5 \cdot \tan(\alpha_{ap}) + 2,6 \cdot \tan^2(\alpha_{ap}) \quad (5)$$

$$k_7 = 2,1 \cdot \tan(\alpha_{ap}) - 4 \cdot \tan^2(\alpha_{ap}) \quad (6)$$

Kaavassa (3) oleva  $r_{in}$  tarkoittaa kuvan 2 mukaista harjapalkin sisäpuolista kaarevuussädettä. Kaavoissa (4), (5) ja (6)  $\alpha_{ap}$  tarkoittaa palkin yläpinnan kaltevuuskulmaa harjan keskellä kuvan 3 mukaan. (SFS-EN 1995-1-1 2014)



**Kuva 3.** Kaareva harjapalkki eli bumerangipalkki. (SFS-EN 1995-1-1 2014, s.49)

Rasitusten käsinlaskenta vie aikaa ja vaatii tarkkuutta, sillä kaavat ovat monivaiheisia ja virheitä voi sattua laskennan eri vaiheissa. Koska nykyään halutaan tehdä samanlaista työtä lyhyemmässä ajassa, pyritään rakenteiden suunnittelua automatisoimaan mahdollisuuksien mukaan entisestään. Tämän takia tulevaisuudessa myös käsinlaskennan tarve pyritään minimoimaan. Olemassa olevat FEM-ohjelmat ovat jo helpottaneetkin laskentaa huomattavasti. Erilaisten ohjelmien kehityksestä huolimatta esimerkiksi rakennesuunnittelijan on kuitenkin tärkeää ymmärtää, mistä eri rasitukset syntyvät, vaikka itse laskenta tehtäisiinkin FEM-ohjelman avulla.

## 4. CASE-KOHDE

Tässä luvussa käsitellään rasiusten laskennan eroavaisuuksia esimerkin kautta. Ensin esitellään itse esimerkki, minkä jälkeen lasketaan puun syysuuntaa vasten kohtisuoran vetojännityksen arvo sekä FEM-ohjelmalla, että eurokoodi 5:n kaavalla. Lopuksi vertailaan saatuja tuloksia ja pohditaan syitä mahdollisille eroavaisuuksille.

### 4.1 Lähtötietoja rasiusten laskentaan

Työssä on tehty parametrinen FEM-malli bumerangipalkille Ansys-ohjelmaa käyttäen. Mallissa parametreinä ovat palkin jänneväli, harjakorkeus, poikkileikkauksen korkeus harjalla ja tuella sekä palkin paksuus. Mallissa ei ole huomioitu puun ortotrooppisuutta ja palkin sivusiirtymä on estetty vain sen toisessa päässä.

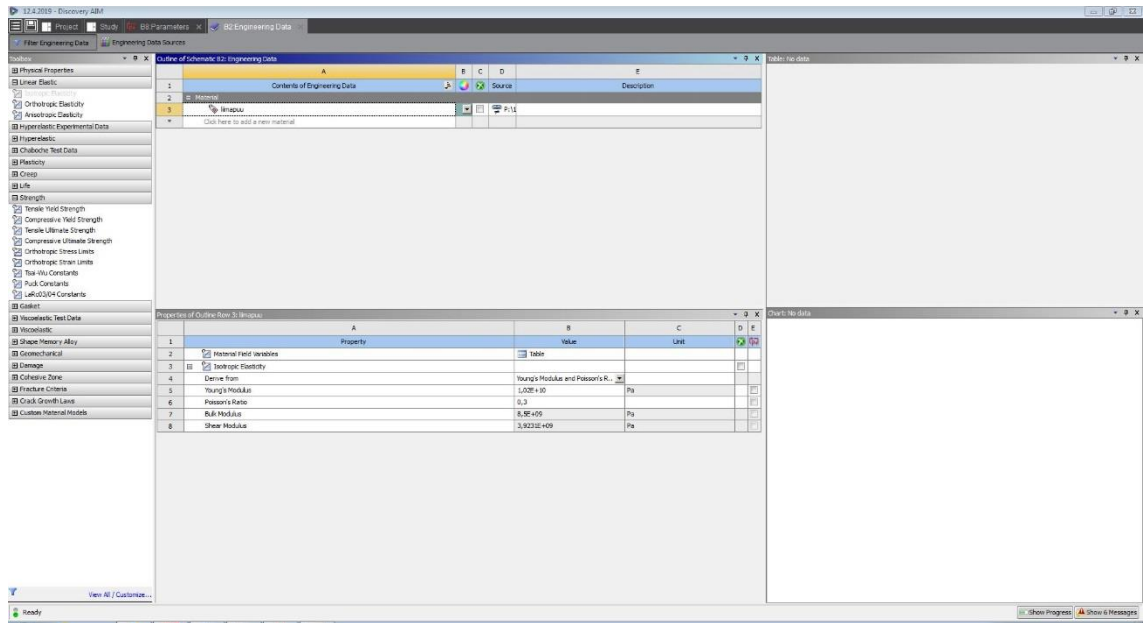
Puun syysuuntaan nähden poikittainen vetojännitys harjavyöhykkeellä lasketaan, kun jänneväli  $L$  on 16 m, kattokaltevuus  $\alpha_{ap}$  on  $21^\circ$ , palkin paksuus  $b$  on 380 mm, poikkileikkauksen korkeus harjalla  $h_{ap}$  on 2100 mm ja tuella 650 mm sekä kuormituksena  $p_d$  on tasainen 20,6 kN/m viivakuorma. Tiedossa on myös kimmomoduulin  $E$  arvo, joka on 10 200 MPa. Näiden arvojen lisäksi oletetaan kuvan 3 mukaisen palkin sisäpuolisen kaarevuussäteen  $r_{in}$  olevan 16 m ja Poissonin luvun  $\nu$  0,3.

### 4.2 Rakenteen mallinnus elementtimenetelmällä

Ansys on yksi elementtimenetelmää hyödyntävä ohjelma, jonka avulla voidaan esimerkiksi suunnitella tuotteita ja tehdä niille erilaisia simulaatioita, kuten tarkastella tuotteen kestävyyttä. Ohjelma mahdollistaa monimutkaisempienkin rakenteiden lujuustarkastelun ja ohjelmaan sisällytetty FEA- (finite element analysis) eli elementtianalyysi näyttää kuinka rakenneosa voisi käyttäytyä erilaisissa tilanteissa. Ansys mahdollistaa kaiken rakenteen geometrian mallintamisesta tuloksiin sekä mahdollisiin ratkaisuihin.

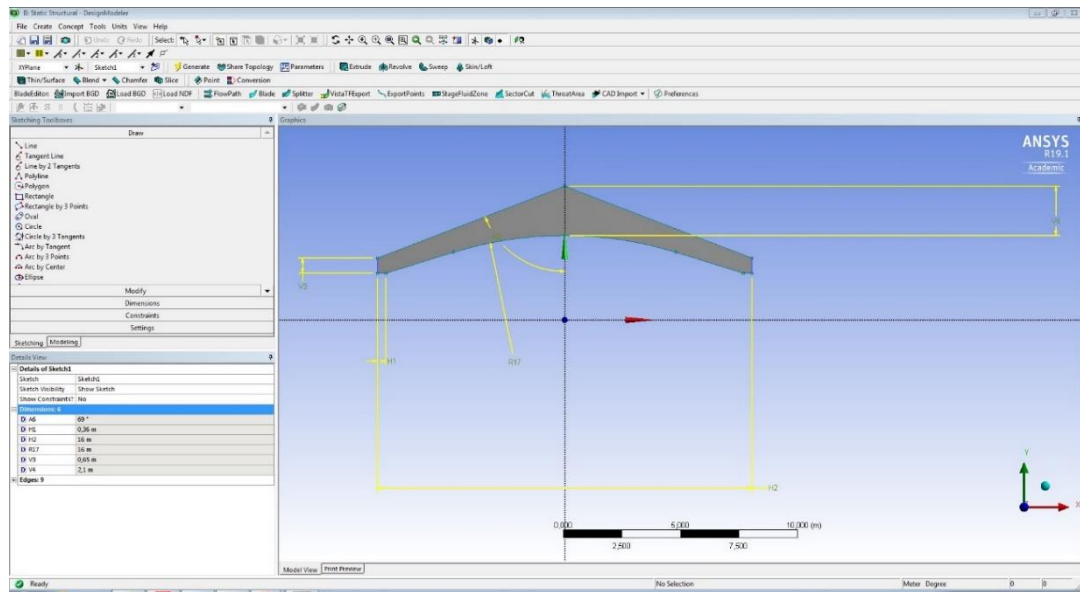
Kun palkkia mallinnetaan Ansys-ohjelmalla, valitaan ohjelmasta ensin haluttu tutkimusalue, joka on tässä tapauksessa rakenteellinen statiikka eli *Static Structural*. Kun tutkimusalue on valittu, syötetään ohjelmaan materiaalitiedot, rakenteen geometria sekä esimerkiksi rakenteen kuormitukset ja tuennat.

Bumerangipalkkia mallintaessa tulee ensin syöttää malliin materiaalitiedot *Engineering data*. Kuvassa 4 on mallia varten luotu materiaali *liimapuu*. Kuvasta nähdään, että *liimapuun* ominaisuudeksi on asetettu isotrooppinen elastisuus, jolloin Ansys-ohjelmaan voidaan syöttää myös kimmomoduulin  $E$  arvo 10 200 MPa ja Poissonin luku  $\nu$ , joka on 0,3. Kuvassa 4 näkyvät muut arvot Ansys laskee syötetyistä arvoista.



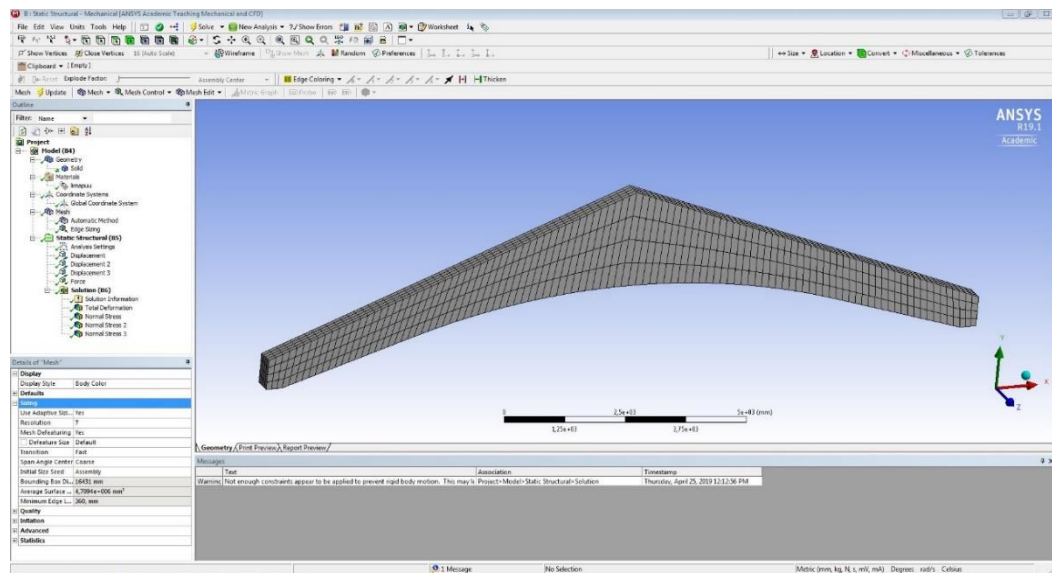
**Kuva 4.** Materiaalitiedot eli *Engineering data*.

Materiaalitiedot annettua piirretään rakenteen geometria Ansys-ohjelmalla. Tämän jälkeen malli voidaan myös parametrisoida. Kuvassa 5 näkyy bumerangipalkin geometria sekä annetut mitat, jotka on parametrisoitu herkkyytarkastelun mahdollistamiseksi. Parametrisointia varten on jokainen mitta nimetty. Geometria tulee lopuksi vielä pursottaa *extrude* halutun paksuiseksi.



**Kuva 5.** Bumerangipalkin geometria ja parametrisointi.

Seuraavaksi tulee pohtia bumerangipalkin verkotusta *meshing*: mitä tiheämmän verkon tekee, sitä tarkempia vastauksia on mahdollista saada. Tämän takia valitaan automaattisen verkotuksen *Automatic method* lisäksi palkin ylittäväksi *Edge sizing* verkotukseksi neljä, jolloin verkotus näyttää kuvan 6 mukaiselta.



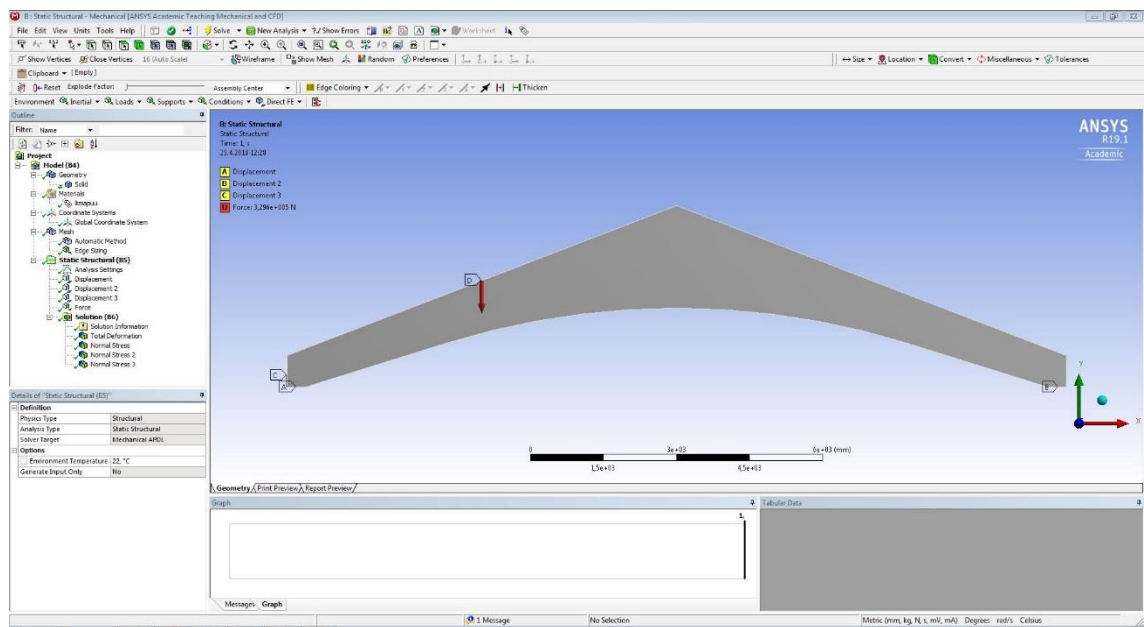
**Kuva 6.** Bumerangipalkin verkotus eli mesh.



Geometrian ja verkotuksen valmistuttua malliin lisätään kuormitukset sekä tarvittavat reunaehdot eli esimerkiksi tuennat. Palkin vasempaan reunaan asetetaan vaaka- ja pystysuuntaiseksi ja oikeaan reunaan pystysuuntaiseksi siirtymäksi 0. Näin saadaan bumerangipalkin molempien reunojen pystysiirtymä sekä lisäksi toisen reunan sivusiirtymä esitettyä. Palkkia kuormittava viivakuorma tulee muuttaa palkin yläpintaa kuormittavaksi resultantiksi kaavan 7 avulla.

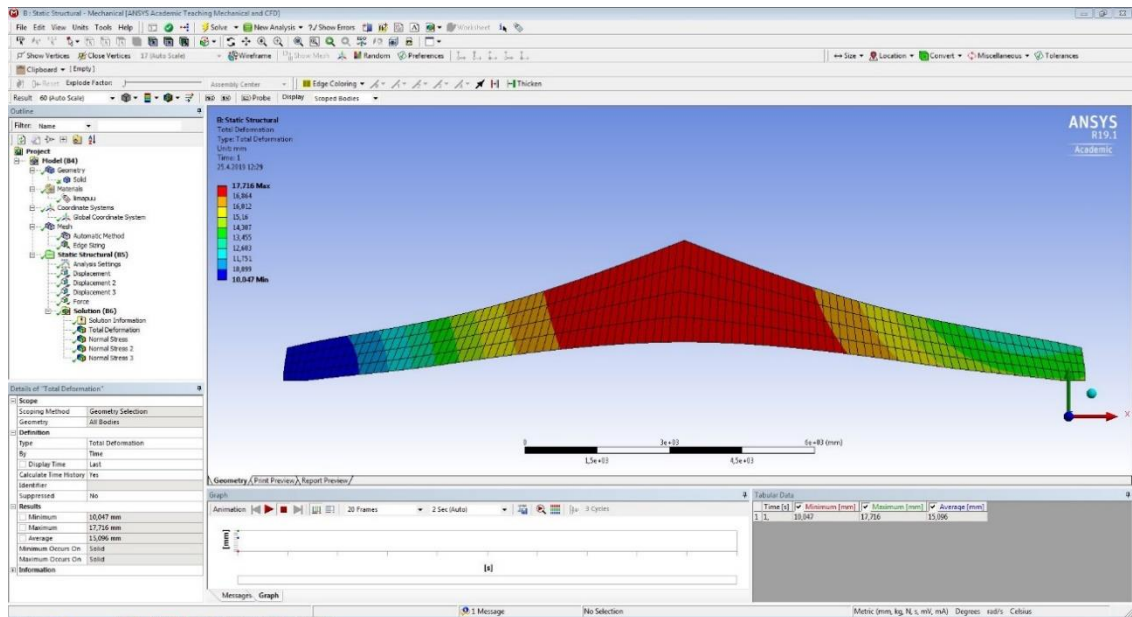
$$R = \frac{p_d \cdot L^2}{2} \quad (7)$$

Kuvasta 7 nähdään tuentojen ja kuormituksen sijainnit ja vaikutukset palkissa.



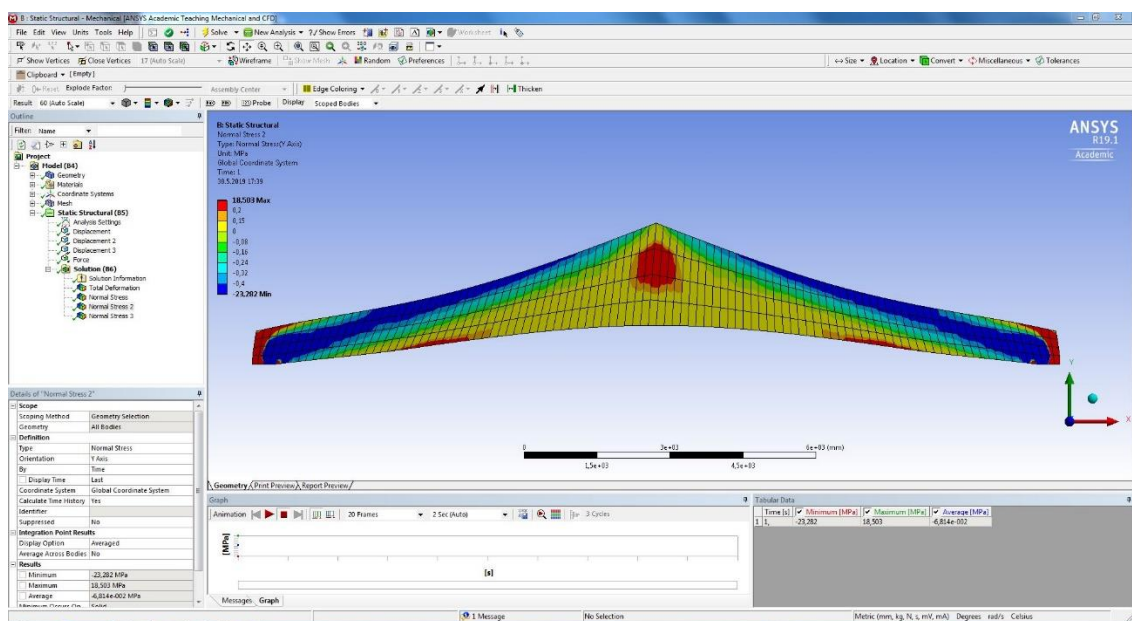
**Kuva 7.** Bumerangipalkin tuennat ja sen yläpintaan vaikuttava viivakuorma.

Seuraavaksi voidaan malliin lisätä tulokset, jotka ohjelman halutaan laskevan, kuten normaalivoimat ja siirtymät. Kuvasta 8 nähdään, että bumerangipalkissa tapahtuu siirtymiä, mutta lopulliset siirtymät kuitenkin pysyvät melko pieninä. Bumerangipalkin maksimisiirtymä on noin 18 mm ja sijaitsee palkin keskellä, sillä palkki on tuettu vain reunoista.



**Kuva 8.** Bumerangipalkin siirtymät eli total deformation.

Koska vastaukseksi halutaan puun suurin syysuuntaan poikittainen vetojännitys, valitaan y-akselin suuntainen normaalivoima, joka tarkoittaa kuvassa pystysuuntaista voimaa. Tämän suuntainen voima on rakennetta eniten rasittava ja muodostaa bumerangipalkkiin kuvan 9 mukaisen jännityskuvaajan.



**Kuva 9.** Bumerangipalkin jännitysjakauma.

Kuvasta 9 voidaan tulkita vetojännityksen olevan merkitty punaisella, oranssilla ja keltaisella värillä. Punaisella alueella vaikuttaa maksimissaan 18,5 MPa, mutta joka tapauksessa yli 0,2 MPa vetojännitys. Sinisellä ja vihreällä merkityillä alueilla on puristusjännitystä, ja mitä tummemman sininen väri on, sitä enemmän puristusta tapahtuu. Kuitenkin niin, että suurin puristusjännitys on 23,3 MPa.

### 4.3 Vertailulaskenta eurokoodien mukaan

Puun suurin taivutusmomentista aiheutuva syysuuntaa vastaan kohtisuora vetojännitys saadaan laskettua kaavan (1) avulla. Kaavassa oleva  $M_{ap,d}$  eli harjan kohdalla vaikuttavan, kaarevan alareunan suuntaisia vetojännityksiä aiheuttavan momentin mitoitusarvo saadaan laskettua normaalin palkin maksimimomentin kaavalla

$$M_{ap,d} = p_d \cdot \frac{L^2}{8}, \quad (8)$$

jossa  $p_d$  on palkin yläpinnalla harjan alueella vaikuttava tasaisesti jakautunut kuorma ja  $L$  on palkin jänneväli.

Lasketaan harjavyöhykkeen suurin syysuuntaan nähden poikittainen vetojännitys sijoittamalla kaavaan (1) arvot  $k_p = 0,087$ ,  $M_{ap,d} = 659,2 \text{ MPa}$ ,  $b = 380 \text{ mm}$ ,  $h_{ap} = 2\,100 \text{ mm}$  ja  $p_d = 20,6 \cdot 10^6 \text{ N/mm}$ .

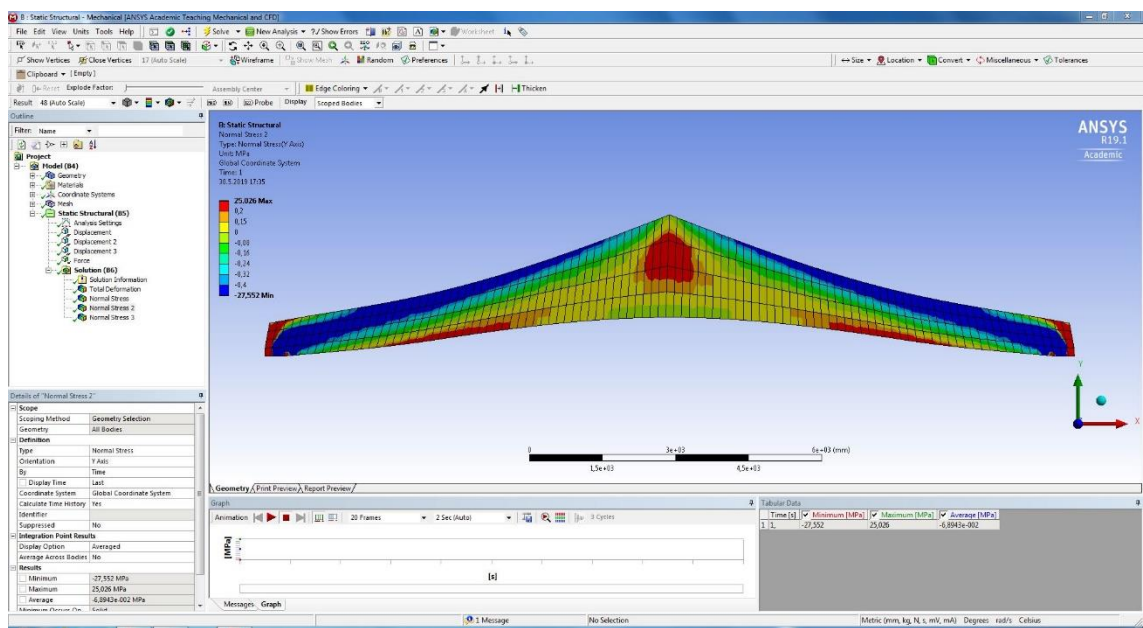
$$\sigma_{t,90,d} = k_p \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} - 0,6 \cdot \frac{p_d}{b} = 0,173 \text{ MPa}$$

Vetojännityksen arvoksi saadaan siis eurokoodien avulla laskemalla 0,173 MPa.

### 4.4 Tulosten vertailu ja eroavaisuuksien pohdinta

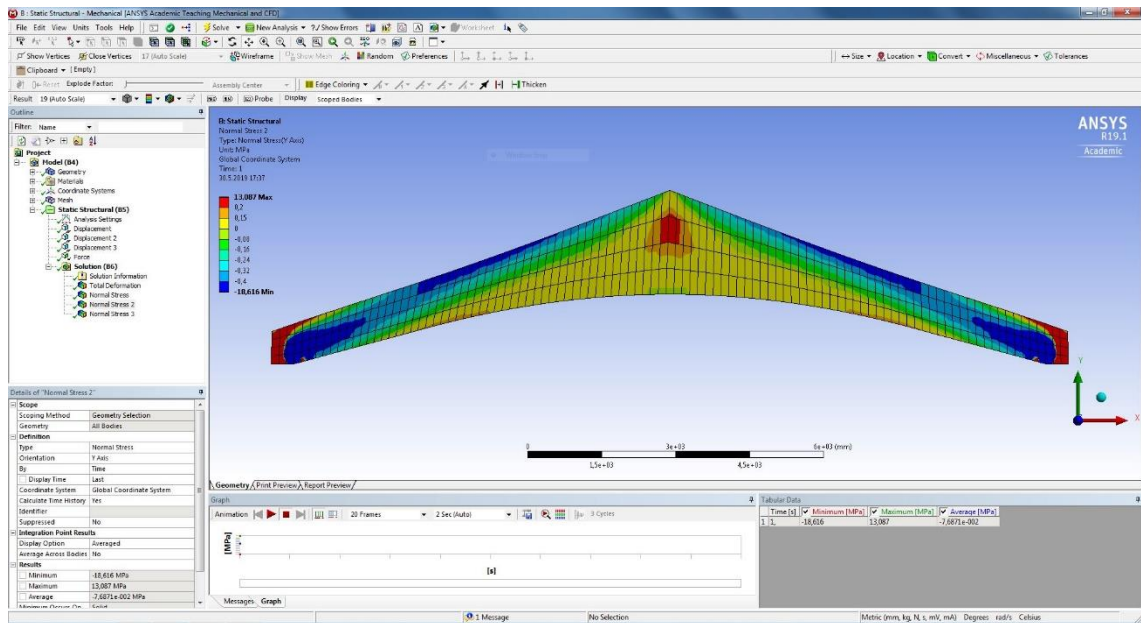
FEM-ohjelman ja eurokoodi 5:n avulla lasketut vetojännitysten arvot eroavat hieman toisistaan. On kuitenkin hieman huolestuttavaa, että FEM-ohjelman avulla saadaan tulokseksi suurempi vetojännitys kuin eurokoodien avulla. Eurokoodit nimittäin täyttävät kantavien rakenteiden olennaiset vaatimukset, eikä valvontaviranomainen enää tarkasta vaatimusten täyttymistä.

Herkkyystarkastelussa palkin tuen leveyttä muuttamalla voidaan tutkia rakenteen käyttäytymistä eri tilanteissa. Tuen leveyttä ei ole määritetty, eikä eurokoodin laskentakavassa tarvita kyseistä pituutta. Kuitenkin Ansys-ohjelmaan syötetään palkin geometria, eli näin ollen myös tuen leveys. Kun palkin tuen leveyden arvoa muutetaan suuremmaksi, saadaan vetojännityksen arvoa pienennettyä. Näin saadaan palkin vetojännityksen arvo lähemmäs eurokoodin avulla laskettua. Esimerkiksi kasvattamalla tai vähentämällä tuen leveyttä 100 mm alkuperäisestä, eli tukileveyden ollessa joko 260 mm tai 460 mm, saadaan kuvien 10 ja 11 mukaiset jännitysjaakaumat.



**Kuva 10.** Bumerangipalkin jännitysjaakauma tuen leveyden ollessa 260 mm.

Kuvia 9, 10 ja 11 vertailemalla nähdään, että palkin tuen leveyden kasvaessa pienenee vetojännityksen arvo.



**Kuva 11.** Bumerangipalkin jännitysjaakauma tuen leveyden ollessa 460 mm.

Kuitenkaan eurokoodissa ei ole mainintaa raja-arvoista, joiden kohdalla laskenta ei olisi mahdollista eli eurokoodin tulisi olla hyväksyttävä laskentatapa kaikilla mitoilla. Kuten esimerkistä voidaan todeta, olisi vaatimusten täyttyminen vielä hyvä tarkastaa esimerkiksi laskettaessa eurokoodin avulla bumerangipalkin vetojännitystä.

Ansyst-ohjelman avulla laskettu puun syitä vastaan kohtisuora vetojännitys on todennäköisesti lähempänä todellisuutta, sillä se huomioi useamman asian ja laskee vetojännityksen ohjelmaan jo ennalta syötettyjen matemaattisten algoritmien avulla. Tämän takia myös virheiden mahdollisuus pienenee. Ohjelman avulla laskeminen helpottaa myös herkkyytstarkastelua, sillä laskentaa ei tarvitse itse suorittaa, mikä vähentää myös laskentavirheitä. Käsin laskemalla virheitä voi puolestaan syntyä useammassa vaiheessa, joita ovat esimerkiksi numeroarvojen sekä itse laskentakaavojen syöttäminen.

## 5. YHTEENVETO

Puun lujuusominaisuuksiin vaikuttavat monet asiat, kuten sen tiheys, kasvunopeus ja puun kosteus. Myös oksat ja muut puun viat, kuten vinosyisyys, heikentävät puun lujuutta. Liimapuun lujuusominaisuudet ovat joka tapauksessa esimerkiksi sahatavaraan verrattuna paremmat, sillä liimapuu koostuu lamelleista, jolloin esimerkiksi yksittäisten oksien vaikutus puun lujuuteen pienenee. Liimapuun kuormitussuunta vaikuttaa sen lujuusominaisuuksiin, jotka ovat heikoimmillaan sen syitä vastaan kohtisuorassa ja usein tämän takia puun syitä vastaan poikittaiset vetojännitykset muodostuvatkin mitoittaviksi.

Rasitusten käsinlaskenta vie aikaa kaavojen pituuden ja monivaiheisuuden takia sekä vaatii huolellisuutta, sillä virheitä voi tapahtua laskennan monissa eri vaiheissa. Tämän takia FEM-ohjelmat kuten Ansys, helpottavat laskentaa. FEM-ohjelmat nopeuttavat laskentaa sekä vähentävät virheitä, sillä niihin on syötetty jo aiemmin tarvittavat matemaattiset algoritmit. Siitä huolimatta käsinlaskennan eurokoodin avulla pitäisi olla aina varmemmalla puolella, sillä FEM-ohjelmat laskevat todellisempia arvoja.

Case-esimerkin kautta voidaan kuitenkin todeta, että ainakaan jokaisessa tilanteessa eurokoodin avulla käsin laskemalla ei saada varmempaa arvoa. Tämä voi johtua esimerkiksi siitä, että FEM-ohjelmaan syötetään useampi tiedetty pituus tai materiaaliominaisuus kuin eurokoodin kaavaan. Esimerkiksi bumerangipalkin tuen leveyttä ei tarvita vetojännitystä eurokoodin avulla laskettaessa. Tämän takia tuen leveyden ollessa liian pieni, on vaarana jopa rakenteen kestättömyys sitä kuormittaessa.

Todennäköisesti FEM-ohjelmalla saadaan lähempänä rakenteen todellista jännitystä oleva arvo kuin eurokoodin avulla laskemalla. Toisaalta rakennesuunnittelussa pyritään laskelmiin sisällyttämään virhetoleransseja, jolloin eurokoodin avulla bumerangipalkin vetojännitystä laskettaessa saattaa varmuuskerroin jäädä liian pieneksi. Eurokoodeissa ei ole mainintaa raja-arvoista, minkä takia laskentakaavan tulisi käydä kaikille pituuksille. Lisäksi eurokoodien oletetaan täyttävän tarvittavat vaatimukset, jolloin niitä ei tarvitse erikseen tarkistaa. Kuitenkin case-esimerkistä voidaan päätellä, että ainakin bumerangipalkin vetojännityksiä laskettaessa olisi hyvä tarkistaa täyttyvätkö rakenteen tarvittavat vaatimukset.

## LÄHTEET

Liimapuukäsikirja, osa 1 (2014). Suomen liimapuuyhdistys ry & Puuinfo oy. 90 s. Saatavissa (viitattu 4.3.2019) [https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Liimapuu\\_low.pdf](https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Liimapuu_low.pdf).

Liimapuukäsikirja, osa 2 (2015). Suomen liimapuuyhdistys ry & Puuinfo oy. 297 s. Saatavissa (viitattu 4.3.2019) [https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Liimapuuk%C3%A4sikirja%20Osa%202\\_0.pdf](https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Liimapuuk%C3%A4sikirja%20Osa%202_0.pdf).

Liimapuukäsikirja, osa 3 (2015). Suomen liimapuuyhdistys ry & Puuinfo oy. 188 s. Saatavissa (viitattu 4.3.2019) <https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Liimapuuk%C3%A4sikirja%20Osa%203.pdf>.

Rakennustuoteteollisuus ry & SFS ry (2018). Eurokoodit – Eurooppalaiset kantavien rakenteiden suunnittelustandardit. Saatavissa (viitattu 22.4.2019) [https://www.sfs.fi/files/309/eurokoodi\\_web.pdf](https://www.sfs.fi/files/309/eurokoodi_web.pdf).

RIL K135-1991 (1991). Kantavien puurakenteiden suunnittelu. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. 208 s.

RIL 153 (1984). Liimapuurakenteet. Suomen rakennusinsinöörien Liitto RIL. 198 s.

Salmi, T. & Kuula, K. (2017). Rakenteiden mekaniikka. 2. painos. Pressus oy. Tampere. 463 s.

SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC (2014) – Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu. Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 224 s.